

Granice fizyki w kosmologii

Leszek M. Sokołowski

Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego
oraz Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych

Limits of physics in cosmology

Abstract

The message is that physics has an „outward bound” of scientific inquiry in the field of cosmology. I present it in the historical development. Physics and astronomy, developing since the seventeenth century, inherited from the early Greek philosophers the conception that the Universe as a whole is invariable. In nineteenth century this conception in conjunction with the conception of eternity of the Universe (being a philosophical conclusion from the conservation laws of mass and energy) gave rise to contradictions with other laws of physics indicating that cosmology is not a branch of physics since the notion of the Universe is not a physical one. Cosmology returned to physics as its important branch due to the advent of general relativity theory and the discovery of the cosmic microwave background radiation.

Modern cosmology generates fundamental problems creating real limits to inquiries in physics viewed as an empirical science. The very notion of the Universe shows that the scientific method reaches there limits of its applicability. Does „to exist” mean „to

be observed by someone”? Should the definition of the Universe be based on a current physical theory, e.g. on Einstein’s general relativity, giving rise to a kind of mathematical instability? Is the fashionable concept of the „multiverse” a physical one or is a purely metaphysical notion in a scientific disguise? If the Universe is unique (as we believe), is it meaningful to describe it in the framework of physics, which by its method always assumes that the number of objects it describes, is unlimited?

Apart from these permanent philosophical problems there are concrete urgent problems generated by cosmology: the nature of dark matter and dark energy. These two species of „substance” appear only in cosmology and do not fit the laboratory physics; contrary to the three centuries long tradition of modern science, now cosmology inspires physics in a troublesome way. A separate class of limits to physics is generated by the theorem in general relativity that the Universe emerged from an initial curvature singularity of the spacetime. At the singularity the whole scientific inquiry breaks down. Cosmology of the very early Universe suggests that in its evolution two specific epochs took place, that of quantum gravity and an inflationary epoch. The underlying them two physical theories are incomplete and seem to be inherently untestable. Furthermore, the experimentally verifiable physics cannot explain the origin of the initial conditions determining properties of the Universe which emerged from the singularity.

Keywords

physical cosmology, the notion of the Universe, dark matter and dark energy, falsifiability of quantum gravity, origin of the Universe.

1. Wstęp

Często powtarza się tezę, iż poznanie fizyczne ma rozmaite granice¹, gdy jednak przyjrzeć się jej dokładniej, a zwłaszcza kontekstowi, w jakim jest wygłaszana, to okazuje się, że nie oznacza ona tego, co literalnie głosi. Nie oznacza ona bowiem, że napotkaliśmy, lub napotkamy w przyszłości, nieprzekraczalne granice naszego pojmowania materialnego świata, które na zawsze zawęzą wiedzę o nim, lecz raczej jest ona optymistycznym stwierdzeniem, że gdy tylko na drodze poznawania go natkniemy się na przeszkodę, to uzbrojeni w dotychczasową wiedzę, mocą abstrakcyjnego myślenia i wyrafinowanych technik eksperymentalnych pokonamy ją i jeszcze silniejsi pójdziemy dalej. Granicą, o której najczęściej jest mowa i którą przekroczymy ku własnej chwale i pożytkowi, jest granica zjawisk mikroskopowych – procesy fizyczne rozgrywające się w skali Plancka. Eksperymentalnie procesy te są nam niedostępne i wielu fizyków twierdzi, że nigdy ich nie wytworzymy, tym niemniej jeszcze więcej badaczy jest przekonanych, że procesy te zostawiają ślady widoczne przy dużo niższych energiach i na dużo większych odległościach. Niczym granice państwowe, granice poznawcze są przekraczalne. W moim przekonaniu granica donioślejsza i bliższa naszej obecnej wiedzy fizycznej tkwi w kosmologii, czyli w poznawaniu tego, co największe. Nie pró-

¹ Jest to spisany tekst referatu wygłoszonego 24 lutego 2014 roku na posiedzeniu Komisji Filozofii Nauk Polskiej Akademii Umiejętności.

bując ustalić, czy jest to granica absolutnie nieprzekraczalna, chcę pokazać, że w przeszłości kosmologia zawsze stawiała przeszkody poznaniu naukowemu, a obecnie mnoży te przeszkody i czyni je skrajnie trudnymi do pokonania.

Zacznę zatem od historii. Fizyka wyszła z kosmologii i obecnie do niej wróciła, przejmując cały balast jej problemów konceptualnych. Kosmologia narodziła się w VI wieku p.n.e. w poglądach jońskich filozofów przyrody i w tym czasie była faktycznie całą nauką i całą filozofią. Wszechświat to był Kosmos – ogół tego, co istnieje, a zarazem był to zbiór bytów materialnych harmonijnie uporządkowanych, był ładem. W tej idei ładu, organizującego świat, można dopatrzeć się załączka koncepcji powszechnych praw przyrody, w tym praw fizyki. Do nas dotarły jedynie strzępy pism tych wczesnych filozofów, nie wiemy więc jak uzasadniali swoje przekonanie o istnieniu tego ładu, jednak na podstawie tych tekstów, które dotrwały do dziś, możemy przypuszczać, iż nie podawali oni argumentów, które możnaby uznać za zasadne (przy ówczesnym poziomie wiedzy). Wydaje się raczej, że ich quasi-religijna wiara w istnienie powszechnego ładu była koniecznym warunkiem wstępnym uzyskania jakiegokolwiek wiedzy o świecie. Wiedzy zdobywanej wyłącznie na drodze intelektualnych dociekań, bowiem idea eksperymentu naukowego wychodzącego poza powszechne doświadczenie ogółu ludzi jeszcze nie powstała. Ten ład ukryty za rojowiskiem pozornie chaotycznych zjawisk i wydarzeń miał być ponadto niezmienny – bez wiary w stałość ładu każdy filozof utonąłby w morzu zmiennych zjawisk. Filozofia, czyli ko-

smologia, czyli fizyka, trwała w tej wszechogarniającej i mętnej formie aż do Arystotelesa, który wprowadził do niej porządek, rozdzielając ją na wiedzę o organizmach żywych, czyli zoologię i botanikę, wiedzę o ciałach nieożywionych, czyli fizykę, oraz kosmologię, czyli wiedzę o ciałach niebieskich, zawartą w systemie geocentrycznym. Tak pojęta kosmologia podlegała prawom fizyki translunarnej i przedstawiała świat absolutnie niezmienny. Tezę o niezmienności świata pozaziemskiego przyjęło nowożytne przyrodoznawstwo.

2. Kosmologia w XIX wieku

W pierwszej połowie XIX wieku nauki przyrodnicze, przede wszystkim fizyka i astronomia, były na tyle już rozwinięte, że problem kosmologii jako nauki o Wszechświecie jako całości powrócił. Sytuacja była konceptualnie dość zagmatwana. Z jednej strony większość przyrodników wyznawała pogląd (do dziś spotykany), iż świat materialny dzieli się na trzy obszary: mikroświat obiektów małych, czyli komórek, molekuł i atomów (wówczas hipotetycznych), makroświat obiektów dostrzeganych wokół nas gołym okiem oraz megaświat gwiazd, ich gromad i ewentualnych obiektów jeszcze większych oraz gigantycznych przestrzeni przez nie zajmowanych i procesów tam zachodzących. (Terminologia wtedy stosowana była inna, lecz to nie ma tu znaczenia). Temu zdroworozsądkowemu podziałowi, odpowiadającemu możliwościom percepcyjnym ludzkich

zmysłów, towarzyszyło przekonanie, że opis każdego z tych światów wymaga odrębnych teorii naukowych i że teorie odnoszące się do jednego świata słabo pasują do pozostałych.

Z drugiej strony fizycy coraz śmielej lansowali tezę o fizycznej jedności tych trzech warstw Wszechświata. Mocnym argumentem za nią było odkrycie przez Josepha Fraunhofera w 1814 r. linii absorpcyjnych w widmie optycznym Słońca, które później zidentyfikowano jako linie absorpcyjne rozmaitych pierwiastków w atmosferze słonecznej, dzięki czemu stwierdzono, że nasza gwiazda składa się z tych samych pierwiastków, które mamy na Ziemi (interesujące jest, że hel najpierw wykryto metodą spektroskopową w 1868 r. na Słońcu – stąd jego nazwa – a dopiero w 1895 r. znaleziono go w minerałach ziemskich, bowiem w powietrzu jest go bardzo mało). Analiza widm pobliskich gwiazd pokazała później, że również gwiazdy zbudowane są z tych samych pierwiastków. Obserwacje astronomii optycznej wykroczyły daleko poza układ planetyarny Słońca i objęły olbrzymią ilość gwiazd grupujących się w rozmaite skupiska. To gigantyczne zbiorowisko materii, którego ziemski świat stanowił tylko drobną część, Alexander von Humboldt nazwał „Wszechświatem” (*universum*), a wiedzę o nim – „kosmologią”.

Fizycy zaczęli się zastanawiać, czy Wszechświat da się opisać prawami fizyki. Już Newton uznał, że siłą spajającą Wszechświat, czyli odpowiedzialną za jego budowę, jest grawitacja i teza ta jest w pełni akceptowana przez obecną fizykę, bowiem większe obiekty astronomiczne są elektrycznie obojętne. Ten

Wszechświat rządzonej siłą newtonowskiej grawitacji miał być wieczny i niezmienny. Wieczność wynikała ze świeżo odkrytych praw zachowania. W chemii ustalono prawo zachowania masy: w dowolnej reakcji chemicznej suma mas reagentów przed i po reakcji jest taka sama. Fizycy stwierdzili zachowanie energii we wszystkich znanych procesach fizycznych: całkowita energia jest niezmienna, mogą się jedynie zmieniać formy, jakie przybiera (kinetyczna, chemiczna itp.). Gdyby więc Wszechświat miał początek lub koniec, to materia (masa) i energia powstawałyby z niczego lub w nicą się obracały, wbrew prawom zachowania. Sama wieczność Wszechświata nie implikowała jeszcze jego niezmienności, lecz obserwacje astronomiczne nie sugerowały na czym ta zmienność miałaby polegać. Tu poglądy filozoficzne zdecydowanie przeważały nad ubogimi i niekonkluzyjnymi faktami empirycznymi. Przejęta od greckich filozofów przyrody wiara w niezmienny ład przyrody, a przez to w niezmienną strukturę Wszechświata, umocniła się i została powszechnie w XIX wieku uznana. Doprowadziła ona do kryzysu w kosmologii.

W owej epoce uważano, że możliwe są tylko dwa modele Wszechświata. Są one znane, więc omówię je zwięźle.

1. „Wszechświat wyspowy”: Wszechświat jest rojowiskiem gwiazd, które tworzą chmurę o olbrzymim, lecz skończonym promieniu, znajdującą się w przestrzeni euklidesowej, czyli chmura ta otoczona jest nieskończoną pustą przestrzenią. Ten rój gwiazd jest grawitacyjnie związany, czyli całkowita jego ener-

gia, będąca sumą energii kinetycznych poszczególnych gwiazd i ich energii potencjalnych (ujemnych) wzajemnych oddziaływań grawitacyjnych jest ujemna. Gwiazdy nie mogą być nieruchome, bowiem siły grawitacyjne ściągnęłyby je ku sobie, powodując zapaść (kolaps) całej chmury. Gwiazdy muszą obiegać lokalne środki ciężkości i globalne centrum. W owej epoce obserwowano jedynie powolne ruchy nielicznych gwiazd. Na ten zarzut można odpowiedzieć, że przypadkowo pobliskie gwiazdy mają małe prędkości względem Słońca, a dalekie gwiazdy są zbyt odległe, by dało się zmierzyć ich prędkości.

Tu jednak pojawiała się daleko większa trudność. Takie rowisko poruszających się gwiazd nie może istnieć dowolnie długo, bowiem zachodzi w nim zjawisko „parowania” gwiazd, analogiczne do parowania kropli wody w powietrzu. Całkowita energia roju gwiazd jest stała, natomiast energie poszczególnych gwiazd są zmienne w czasie, bowiem każda porusza się w zmiennym potencjale grawitacyjnym zależnym od położenia pozostałych gwiazd. Zderzenia gwiazd są rzadkie, natomiast dość często mijają się w niewielkiej (względnie) odległości i wtedy oddziaływanie grawitacyjne takiej pary może powodować przekaz energii kinetycznej od jednej gwiazdy do drugiej. W niektórych zbliżeniach jedna gwiazda może pobrać tak dużą energię od drugiej, że jej prędkość przekroczy drugą prędkość kosmiczną całej chmury i gwiazda ta ucieknie z roju. Druga gwiazda utraci tyle energii kinetycznej, że będzie stopniowo zbliżać się do centrum. Zatem najszybsze gwiazdy, mające dodatnią energię, będą rozpraszać się do nieskończoności w prze-

strzeni, a pozostałe, o ujemnej energii (z coraz większym modulem), będą skupiać się w centrum. Innymi słowy, część gwiazd stanie się swobodna i rozbiegnie się w przestrzeni, a pozostałe skolapsują w jedną wielką bryłę. Według mechaniki wielu ciał jest to proces niezmiernie powolny i „wyparowanie” gromady gwiazd trwa wiele miliardów lat – dużo dłużej niż wiek Wszechświata określony w kosmologii relatywistycznej – lecz czas jego zachodzenia jest bez znaczenia: jeżeli Wszechświat istnieje nieskończenie długo, to obecnie nie może być takim rojem gwiazd. „Wszechświat wyspowy” należy odrzucić.

2. Wszechświat jednorodny nieskończony. Newton zauważył, że gdyby punktowe gwiazdy o jednakowej masie umieścić dokładnie w węzłach nieskończonej sieci sześcienniej, to ich wzajemne siły przyciągania równoważyłyby się i taka sieć gwiazdowa byłaby nieruchoma. Jest to jednak konstrukcja niestabilna i niewielkie nawet przesunięcie jednej gwiazdy lub zmiana jej masy spowodowałyby, że siły ciężenia przestałyby się równoważyć i sieć ta zawaliłaby się jak domek z kart.

Bardziej obiecująca jest hipoteza, że kosmiczna materia jest ciągła jak ciecz lub gaz i że wypełnia całą nieskończoną przestrzeń ze stałą gęstością. Taki ośrodek jest jednorodny i izotropowy. Wprawdzie w XIX w. obserwacje tego nie potwierdzały (faktycznie były tak skromne, że niczego w tej kwestii nie rozstrzygały), lecz można było przypuszczać, że tak właśnie rozmieszczona jest kosmiczna materia. Ten model wywrócił się na dwu nieprzezwycięzalnych trudnościach.

A. Paradoks Olbersa

W 1610 r. astronom niemiecki Johannes Kepler zauważył, iż gdyby jednakowe gwiazdy były równomiernie rozłożone w przestrzeni aż do nieskończonych odległości, to łącznie docierałyby od nich do nas nieskończona ilość światła. Nie rozwinął tej myśli, bowiem w tym czasie był to problem zupełnie abstrakcyjny. Ponownie pojawił się w 1721 r. w liście angielskiego astronoma Edmunda Halleya (tego od komety) i w XVIII wieku zainteresował niektórych astronomów, lecz dopiero niemiecki popularyzator astronomii Heinrich Olbers rozpropagował go nadając mu w 1823 r. prostą i efektowną postać pytania: „dlaczego nocne niebo jest ciemne?”. Załóżmy, że gwiazdy są rozmieszczone równomiernie w całej przestrzeni i że każda emituje w jednostce czasu tyle samo światła (założenie to jest nieistotne, jedynie upraszcza rachunki bez zmiany wyniku). Ilość światła docierającego do nas od gwiazdy odległej o r maleje z odległością jak $1/r^2$, za to pole powierzchni cienkiej warstwy sferycznej o promieniu r rośnie jak r^2 , a tym samym liczba gwiazd znajdujących się w tej warstwie też rośnie jak r^2 . Zatem ilość dochodzącego do nas światła z każdej warstwy jest taka sama, niezależnie od tego, czy warstwa jest blisko (i jest więc mała), czy też jest daleko i zawiera wiele gwiazd. Skoro takich warstw jest nieskończenie wiele (bo gwiazdy wypełniają całą przestrzeń), to na Ziemię winno padać światło o nieskończonej mocy. Oczywiście tak nie jest.

Argumentowano, że gwiazdy nie są punktowe i widać je jako małe tarcze na niebie, zatem gwiazdy bliższe przysła-

nią nam dalsze i światło dalekich gwiazd nie dociera do nas. Oznacza to, że w którąkolwiek stronę spojrzeć, nasz wzrok trafi w tarczę jakiejś gwiazdy i każdy kawałek nieba winien świecić tak jasno jak Słońce. Tarczę Słońca widać z Ziemi pod kątem pół stopnia, co oznacza, że całą sferę niebieską można pokryć za pomocą 180 000 tarcz słonecznych, a zatem z całego nieba winna do nas docierać (w dzień i w nocy) ilość promieniowania 180 000 razy większa niż ze Słońca. Oczywiście tak nie jest.

Wysuwano rozmaite hipotezy, lecz astronomia XIX wieku nie była w stanie z paradoksem Olbersa sobie poradzić. Wieczny, nieskończony i niezmienny Wszechświat musiał nas oślepić.

B. Paradoks grawitacyjny Seeliger

W latach 1894–96 niemieccy badacze, astronom Hugo von Seeliger i matematyk Karl Neumann, zauważyli, że w nieskończonym, jednorodnym i wiecznym Wszechświecie prawo powszechnego ciążenia prowadzi do sprzeczności. Rzeczywiście, w jednorodnym izotropowym nieskończonym ośrodku żaden punkt i żaden kierunek nie jest wyróżniony, zatem w każdym punkcie siła grawitacyjna działająca na dowolną cząstkę ze strony całego nieskończonego ośrodka musi znikać, $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, bo- wiem tylko wektor $\mathbf{0}$ nie wyróżnia żadnego kierunku. Siła grawitacyjna jest gradientem potencjału, $\mathbf{F} = \text{grad } U$ i jeżeli siła wszędzie znika, to $U = \text{const}$. Prawo powszechnego ciążenia jest podstawowym rozwiązaniem fundamentalnego dla newtonowskiej teorii grawitacji równania Poissona dla potencjału,

$$\Delta U = 4\pi G\rho,$$

gdzie ρ jest gęstością masy ośrodka, a G jest stałą grawitacyjną Newtona. Jeżeli potencjał jest stały, to $\rho = 0$ – nie ma materii. Dla $\rho = \text{const} > 0$ istnieje rozwiązanie matematycznie poprawne, $U \sim r^2$, lecz jest ono jawnie niefizyczne: siła grawitacyjna działająca na cząstkę w danym miejscu zależy – co do wartości i kierunku – od wyboru początku układu współrzędnych, czyli punktu $r = 0$.

Tego problemu w ramach newtonowskiej teorii grawitacji rozwiązać nie można. Czasami w literaturze o paradoksie grawitacyjnym można przeczytać, że jego powodem jest fałszywe założenie o statyczności Wszechświata (obecnie wiemy, że Wszechświat ewoluuje). Tak nie jest: w teorii Newtona ruchy materii nie grają roli i siła grawitacyjna w danym miejscu zależy tylko od rozmieszczenia mas w tej samej chwili, czyli propaguje się z nieskończoną prędkością. Gdyby nieskończony jednorodny ośrodek ewoluował i gęstość masy była funkcją czasu, $\rho = \rho(t)$ (ale nie przestrzeni), to mielibyśmy ten sam paradoks.

Wniosek z paradoksu grawitacyjnego

Prawo powszechnego ciążenia *nie* jest powszechne – stosuje się (i jest dobrze sprawdzone) tylko dla skończonych (w przestrzeni) skupisk materii, czyli mających skończoną całkowitą masę. Ten warunek wyznacza granicę fizyki klasycznej. Jednorodny nieskończony ośrodek jest za tą granicą i nie da się go opisać w ramach tej fizyki.

Pod koniec XIX wieku wyciągnięto stąd ostatecznie wniosek, że Wszechświat nie jest obiektem fizycznym i nie stosują się do niego prawa fizyki. Fizyka stosuje się do poszczególnych agregatów materii, mniejszych lub większych, lecz nie do „wszystkiego, co istnieje”. Wszechświat to pojęcie filozoficzne, nie fizyczne.

3. Powstanie kosmologii relatywistycznej

Zmiana tej sytuacji wymagała odejścia od fizyki newtonowskiej. Zanim do tego doszło, na początku XX wieku podjęto ostatnią próbę zastosowania tej fizyki do nieskończonego Wszechświata. Dokonał tego szwedzki astronom, Carl Charlier (1862–1934), proponując w 1908 r. koncepcję „Wszechświata hierarchicznego”, którą rozwinął w 1922 r. Paradoxy Olbersa i Seeligera biorą się stąd, że zakładamy stałą gęstość materii w nieskończonej przestrzeni. Charlier zaproponował, by zrezygnować z tej stałości. Weźmy kulę o środku w Słońcu i promieniu sięgającym do pasa Kuipera (zbiorowisko drobniejszych ciał niebieskich tworzące z grubsza granicę Układu Słonecznego) i obliczmy średnią gęstość materii w tej kuli (dominujący wkład do niej daje oczywiście Słońce). Porównajmy tę gęstość z gęstością materii zawartej w kuli o środku w Słońcu i promieniu 100 lat świetlnych (znajduje się w niej ponad sto tysięcy gwiazd); gęstość w niej będzie mniejsza niż w Układzie Słonecznym. Następnie weźmy kulę o promieniu równym promieniowi Drogi

Mlecznej, ok. 50 000 lat świetlnych; zawarta jest w niej cała Galaktyka. Ponieważ Droga Mleczna to cienki dysk leżący w płaszczyźnie równikowej tej kuli, gęstość materii w niej jest mniejsza niż w poprzedniej kuli. Według Charliera ten proces można ciągnąć *ad infinitum*, im większy jest obszar przestrzeni, tym mniejsza jest gęstość masy zawartej w nim materii. W granicy nieskończenie wielkich obszarów, gęstość kosmicznej materii zmierza do zera. Charlier wykazał, że we wszechświecie z taką hierarchią gęstości materii oba paradoksy znikają.

Model hierarchiczny nie przyjął się, bowiem pojawił się zarazem za wcześnie i za późno. Pojawił się za wcześnie, bowiem w tamtej epoce miał zbyt słabe oparcie obserwacyjne: malenie gęstości można było stwierdzić tylko w odniesieniu do pierwszych dwu kul, a o budowie, rozmiarach i masie Drogi Mlecznej wiedzano zbyt mało, by twierdzić, że jej gęstość jest odpowiednio mniejsza. Teza, że następne, coraz większe kule tworzą ciąg o malejącej gęstości, była czystą spekulacją teoretyczną, bez szans na weryfikację w obserwacjach. Charlier wystąpił też za późno: zanim astronomowie zdołali zapoznać się i oswoić z jego pomysłem, pojawiła się idea nieporównanie potężniejsza i ogólniejsza – ogólna teoria względności Einsteina. Warto natomiast podkreślić, że idea Charliera, wymagająca nieskończonego ciągu coraz większych obszarów Kosmosu, fundamentalnie wykraczała poza empiryczne granice fizyki. Wszechświat, aby stać się obiektem fizycznym podległym prawom fizyki, musiał stać się konstrukcją czysto matematyczną, czyli faktycznie metafizyczną.

Przełomem była ogólna teoria względności, która w jednoznaczny sposób uwolniła się od wszystkich problemów kosmologii nierelatywistycznej i dylematów modelu Charliera. Oto kilka najważniejszych punktów historii kosmologii relatywistycznej.

1915 – pod koniec tego roku Einstein znajduje równania pola grawitacyjnego i tym samym kończy formułowanie podstaw nowej teorii; w następnym roku publikuje obszerny artykuł przedstawiający OTW. Grawitacja nie jest wyrażona siłą (wektorem), lecz krzywizną czasoprzestrzeni (tensorem), zatem znika problem wyróżnionego kierunku w jednorodnym izotropowym ośrodku.

1917 – Einstein stosuje OTW do opisu całego Wszechświata widząc, że ta teoria pokonuje bez trudu przeszkody, na których wywróciła się grawitacja newtonowska. Kosmologia wraca do fizyki. Einstein utożsamia matematycznie Wszechświat z pewnym rozwiązaniem równań pola grawitacyjnego. Wybiera to rozwiązanie nie w oparciu o obserwacje astronomiczne, lecz kierując się jego prostotą: materia i przestrzeń są jednorodne i izotropowe. Einstein bez wahania wpisuje się w dostojną tradycję filozoficzną traktowania Wszechświata jako niezmiennego. To nie jest jednak łatwe i wymaga modyfikacji równań pola: należy wprowadzić do nich dodatkowy człon – *człon kosmologiczny* – zawierający dowolny parametr, *stałą kosmologiczną*. Fizycznie modyfikacja ta nie ma (w tamtej epoce) żadnego uzasadnienia i sama nazwa wskazuje, że spowodowana jest filozoficznie pojmowaną kosmologią.

1922–1924 – Aleksander Friedmann wykazuje, że czasoprzestrzeń z jednorodnym i izotropowym rozmieszczeniem materii muszą ewoluować w czasie nawet w obecności członu kosmologicznego. Einstein krytykuje Friedmanna, potem krytykę odwołuje, chyba nie za bardzo wie jakie zająć stanowisko wobec jego wyników. Ta chwiejność sprawia, że wyniki te znikają z pola widzenia badaczy.

1927 – Georges Lemaître niezależnie odkrywa modele Friedmanna i wyprowadza w nich prawo Lemaître’a–Hubble’a rozszerzania się Wszechświata. Jego praca opublikowana w mało znanym lokalnym czasopiśmie zostaje przeoczona i na kilkadziesiąt lat traci pierwszeństwo.

1929 – Edwin Hubble ogłasza wyniki obserwacji galaktyk (głównie innych badaczy) i propaguje zjawisko powszechnej ucieczki galaktyk (tzw. prawo Hubble’a, zwane obecnie prawem Lemaître’a–Hubble’a).

Po 1930 – Einstein uznaje ogłoszoną przez Hubble’a powszechną ucieczkę galaktyk i odrzuca swój statyczny model Wszechświata. Jest to koniec trwającej 25 wieków wiary w niezmiennosc Wszechświata. W konsekwencji Einstein usuwa człon kosmologiczny ze swoich równań ($\Lambda = 0$). Stała kosmologiczna jednak nie ginie, lecz zostaje wyparta na dalekie peryferie fizyki, skąd powróci triumfalnie w latach siedemdziesiątych do samego centrum fizyki fundamentalnej.

Wydarzenia tych pierwszych kilkunastu lat istnienia OTW prowadzą do ważnego wniosku: *Wszechświat jest obiektem fizycznym i fizyka stosuje się do niego jako całości. Skoro tak,*

to wszystkie jego własności są ustalane przez fizykę i nie mogą być deklarowane poza nią w postaci założeń filozoficznych. Wszechświat podlega prawom fizyki, a nie ustala je dla siebie. Jego ewolucja wynika z tych praw i nie może być postulowana a priori.

W latach trzydziestych XX wieku kosmologia relatywistyczna napotkała silny opór wielu fizyków przeciwko nieuniknionej osobiwości pierwotnej w modelach Friedmanna, implikującej, że Wszechświat miał początek w skończonej przeszłości. Wynikał on głównie z wiary w absolutną słuszność prawa zachowania energii, które zostałyby złamane w procesie wyłaniania się Wszechświata z tej osobiwości. Dopiero później uświadomiono sobie, że zachowanie energii nie jest aksjomatem fizyki, lecz twierdzeniem, które należy odrębnie dowieść w każdej teorii fizycznej uważanej za prawdziwą. W OTW na ogół, również poza rozwiązaniami kosmologicznymi, prawa zachowania energii udowodnić nie można, co jest poważnym problemem tej teorii i przedmiotem nadal trwających intensywnych badań. Zatem w kwestii praw zachowania fizyka napotkała swoje granice (przejsciowe lub nieprzekraczalne) najpierw na terenie kosmologii.

Do złej reputacji kosmologii przyczynił się sam Hubble, w owym czasie bardzo głośny astronom, swoimi pomiarami stałej Hubble'a, obciążonymi olbrzymimi błędami systematycznymi, których uparczywie nie dostrzegał. Z jego pomiarów wynikał wiek Wszechświata, liczony od pierwotnej osobiwości, mniejszy od wieku Ziemi; wydaje się, że Hubble'owi ta sprzeczność nie przeszkadzała.

W latach 1946–53 znany amerykański fizyk jądrowy George Gamow (uciekinię z Rosji), rozważał wraz ze współpracownikami ważną konsekwencję istnienia pierwotnej osobliwości w modelach Friedmanna. Skoro tuż po wyłonieniu się z tej osobliwości Wszechświat był bardzo skurczony, to wypełniająca go materia była bardzo ściśnięta, zatem bardzo gorąca, zatem tworzyła gorącą plazmę cząstek elementarnych, zatem zachodziły w niej reakcje termojądrowe syntezy jąder analogiczne do syntezy wodoru w hel w gwiazdach. Gamow był przekonany, że w ten sposób powstały wszystkie obecnie istniejące pierwiastki chemiczne. Pomysły Gamowa, pomimo intensywnego propagowania, nie przekonały ogółu fizyków i nie zainteresowały astronomów – kosmologia oparta na modelach Friedmanna miała kiepską reputację i uchodziła za *science fiction*, a nie za dział empirycznie weryfikowalnej nauki – wywołały natomiast silną reakcję przeciwników zgromadzonych wokół głośnego astronoma angielskiego Freda Hoyle’a (1915–2001). Opisywaną przez Lemaître’a ewolucję Wszechświata wyłaniającego się z pierwotnej osobliwości określił w 1949 r. Hoyle szyderczo jako „big bang” („wielkie bum”); nie przewidział, że dwadzieścia lat później ta drwiąca nazwa stanie się poważnym i powszechnie używanym terminem naukowym. Dla Hoyle’a idea Wielkiego Wybuchu była pseudonauką, religijnym kreacjonizmem wyrażonym w języku naukowym. W 1948 r. przeciwstawił kosmologii friedmannowskiej model *wszechświata stacjonarnego*: wiecznego i niezmiennego, lecz nie statycznego. Był to wszechświat-rzeka: wiecznie płynąca ze stałą prędkością,

obserwator na brzegu widzi, że jedne krople przepływają koło niego, inne, takie same, nadpływają i tak stale bez zmian. Tymi kroplami były galaktyki rozbiegające się zgodnie z prawem Le-maître’a–Hubble’a. Tak jak w przypadku rzeki trzeba założyć, że ma ona wiecznie działające ze stałą wydajnością źródło, tak trzeba było wyjaśnić skąd się biorą galaktyki, skoro oddalają się i gęstość materii spada. Pomysł Hoyle’a i współpracowników był zaskakujący: istnieje swoiste „pole kreacji”, które kreuje cząstki elementarne, z których powstają atomy, a te następnie grupują się w gwiazdy i galaktyki; to wszystko zachodzi dokładnie w takim tempie, by ściśle skompensować ubytek materii wskutek rozszerzania się Wszechświata. Ten model ma dwie fundamentalne słabości. Po pierwsze, nigdy nie udało się skonstruować na gruncie fizyki kwantowej mechanizmu kreacji materii; trzeba było założyć *ad hoc* kreację bez zachowania energii. Tempo tej kreacji musi być tak małe, że jest całkowicie poza zasięgiem eksperymentu (pół wieku temu i dzisiaj), jest więc to idea nieempiryczna. Po drugie, ponieważ nie jesteśmy w wyróżnionym miejscu we Wszechświecie (Hoyle zgadzał się z tym), to bardzo odległy obserwator powinien widzieć ucieczkę galaktyk z tą samą prędkością jaką my mierzymy, zatem tempo tej kreacji winno wszędzie być takie samo i dopasowane do tej prędkości ucieczki. Model stacjonarnego świata opiera się na postulacie, że procesy fizyczne zachodzące „tu i teraz” są skorelowane (wywołane?) z procesami zachodzącymi „daleko stąd i w przeszłości”. Przypomina to koncepcję Ernsta Macha (1838–1916), iż masy ciał wokół nas są wynikiem oddziaływania tych

ciał z dalekimi galaktykami. Podobnie jak ta idea Macha, pomysł Hoyle’a korelacji zjawisk na odległościach kosmologicznych jest niezgodny z całą fizyką, która zakłada, że możemy badać lokalne zjawiska fizyczne bez uwzględniania tego, co dzieje się bardzo daleko stąd (bo tego, co dzieje się w odległych miejscach, nie możemy kontrolować).

Postawa Hoyle’a jako naukowca była kontrowersyjna. Nigdy nie wycofał się z koncepcji wszechświata stacjonarnego, mimo że kosmologia Friedmanna okazała się prawdziwsza, bowiem potwierdzają ją dwa ważne fakty: istnienie promieniowania reliktowego oraz pierwotna nukleosynteza najlżejszych pierwiastków – z nimi model Hoyle’a ma fundamentalne trudności. Hoyle zwalczał kosmologię Friedmanna–Lemaître’a, bowiem uważał ją za pseudonaukowy kreacjonizm. Moim zdaniem to stacjonarny model wszechświata jest konstrukcją pseudonaukową: dla ratowania wieczności i niezmienności Wszechświata wprowadza dwie nieweryfikowalne empirycznie hipotezy niezgodne z istniejącą fizyką.

Trzeba przyznać, że opór Hoyle’a miał jeden pozytywny skutek. Sprzeciwiając się idei Gamowa powstania pierwiastków w pierwotnej nukleosyntezie, wysunął hipotezę, a następnie w latach 1954–57 opracował (wraz z Williamem Fowlerem, Margaret Burbidge i Geoffreyem Burbidgem) teorię nukleosyn-tezy pierwiastków w ciężkich gwiazdach, która (z pewnymi modyfikacjami i uzupełnieniami) jest obecnie powszechnie przyjęta. Jednak idea Gamowa okazała się, ze znacznymi zmianami, też poprawna: deuter, hel i lit powstały w pierwotnej nukleosyn-

tezie w plazmie wczesnego Wszechświata. W astrofizyce często tak bywa, że określony wynik nie jest osiągnięty na teoretycznie najprostszej drodze.

Jak widzimy, kosmologia, zarówno Friedmanna–Lemaître’a jak i Hoyle’a, przypiera fizykę do granic poznania.

Drugi i definitywny przełom, wprowadzający kosmologię jako naukę empiryczną do fizyki, nastąpił w 1965 r. Miało wtedy miejsce odkrycie, które nastąpiło we właściwym czasie (świat naukowy dojrzał do jego akceptacji) i którego dokonali właściwi ludzie (tzn. Amerykanie): odkryto promieniowanie reliktowe, czyli elektromagnetyczny relikw epoki, gdy wczesny Wszechświat był wypełniony plazmą swobodnych elektronów i protonów. To odkrycie, jedno z najważniejszych w XX wieku, natychmiast uczyniło kosmologię pełnoprawnym i ważnym działem fizyki. W ciągu paru następnych lat opracowano Standardowy Model Kosmologiczny opisujący historię Wszechświata od drobnego ułamka sekundy po Wielkim Wybuchu do chwili obecnej (w miarę dobrze znamy ery wczesnego Wszechświata do momentu rekombinacji – powstania neutralnego wodoru z plazmy swobodnych protonów i elektronów, późniejszą epokę znamy gorzej); ten model, stale uzupełniany rozmaitymi szczegółami, do 1999 r. nie wymagał większej korekty.

4. Co to jest Wszechświat i jaką fizyką go opisywać?

Definitywne wejście kosmologii w obręb fizyki pół wieku temu nie oznaczało, że jej problemy graniczne zniknęły, lub że zostały z niej usunięte, przeciwnie, stały się odtąd problemami fizyki jako takiej i tym samym nabrały znaczenia. Są to problemy albo nierozstrzygalne, albo trudne do rozwiązania, toteż większość fizyków, mających podejście pozytywistyczne („zajmujemy się jakimś problemem, gdy jest realna szansa na jego rozwiązanie”) woli je odłożyć, lecz nie unieważnić.

Weźmy najbardziej oczywisty problem: co właściwie jest dziedziną kosmologii? Co to jest Wszechświat? Astronom podaje definicję czysto operacyjną przez wyliczenie obiektów badanych:

„Wszechświat, Kosmos, to układ wszystkich obiektów astronomicznych, materii rozproszonej i pól fizycznych wraz z czasoprzestrzenią, którą wypełniają” (Jaroszyński, 2005).

Definicje fizyków są trochę zróżnicowane.

„Wszechświat jest największym zbiorem obiektów (zdarzeń), do których można zastosować prawa fizyki w sposób spójny i sensowny” (Bondi, 1961).

„W kosmologii staramy się badać świat jako całość i nie ograniczać się do jego zamkniętych podukładów, takich jak laboratorium, Ziemia, Układ Słoneczny itd.” (Sextl i Urbantke, 1983).

„Wszechświat oznacza wszystko to, co istnieje w sensie fizycznym” (Ellis, 2006, s. 1183–1285).

Najnowszy podręcznik kosmologii relatywistycznej formuluje ją następująco: „Fizyczny Wszechświat jest największym zbiorem obiektów fizycznych, które są lokalnie powiązane kauzalnie ze sobą wraz z obszarem czasoprzestrzeni dostępnej nam obserwacjami astronomicznymi” (Ellis, Maartens i MacCallum, 2012).

Wszystkie te definicje zawierają niejasne punkty. „Wszystko, co istnieje”? Czy „istnieć” znaczy „być postrzeganym (przez przyrząd pomiarowy lub istotę inteligentną, np. nas na Ziemi)”? Gdyby te dwa pojęcia utożsamić, to istnienie byłoby zrelatywizowane do obserwatora opisującego Wszechświat. Tak być nie może, bo wiemy, że dla obserwatorów z Ziemi istnieją obszary fundamentalnie niedostępne. Nie zobaczymy wnętrza żadnej czarnej dziury, wiemy też, że w czasoprzestrzeniach mających sens kosmologiczny istnieją *horyzonty kosmologiczne* wynikające z faktu, że wszelkie niosące energię sygnały rozchodzą się z prędkością nie większą od prędkości światła c . Nawet w obrębie szczególnej teorii względności nie każdy obserwator (żyjący nieskończenie długo) może otrzymać sygnał z dowolnego punktu czasoprzestrzeni Minkowskiego, ani też do dowolnego punktu wysłać sygnał – dotyczy to np. obserwatora poruszającego się ruchem hiperbolicznym (obserwator ten ma stałe przyspieszenie w każdym chwilowym inercyjnym układzie spoczynkowym). Sądzę, że obecnie przyjęty jest pogląd (niejawnie wyrażony w ostatniej definicji), iż jakiś obiekt

fizycznie istnieje, jeżeli oddziałuje (lub może oddziaływać) lokalnie z jakimś innym obiektem fizycznym, który z kolei może być obserwowany przez nas; ten łańcuch pośredników może być dowolnie długi, byle skończony. To brzmi rozsądnie, lecz niektórzy fizycy zajmujący się matematyczną OTW idą dalej.

„Wszechświat to maksymalne rozszerzenie analityczne pewnego rozwiązania równań Einsteina należącego do klasy czasoprzestrzeni kosmologicznych” (Hawking i Ellis, 1973).

Ta definicja jest zrelatywizowana do aktualnie przyjmowanej teorii fizycznej – OTW – i wykracza poza empirię nadając byt fizyczny pewnej konstrukcji matematycznej. Jeżeli ją przyjmujemy, to musimy zaakceptować jej trzy ważne konsekwencje.

1. Pewna część Wszechświata jest pryncypialnie niedostępna wszelkim obserwacjom. Przykładowo dostarczają czarne dziury (abstrahuję tu od faktu, że świat, w którym żyjemy, jest różny od czarnej dziury). Weźmy najprostszą, niewirującą czarną dziurę Schwarzschilda. Zakładamy, że każda cywilizacja uprawiająca naukę żyje nad horyzontem zdarzeń, w obszarze zewnętrznym. Maksymalne rozszerzenie analityczne tej dziury przedstawia czasoprzestrzeń złożoną z obszaru pod horyzontem w przeszłości (ograniczonego osobliwością „białej dziury”) i z tego obszaru cywilizacja ta może dostawać sygnały przechodzące przez przeszły horyzont, następnie z obszaru zewnętrznego oraz obszaru pod horyzontem przyszłości zakrywającego (dla obserwatora w obszarze zewnętrznym) osobliwość czarnej dziury w przyszłości. Z obszaru wewnętrznego pod horyzontem przy-

szości obserwator nie dostanie żadnego sygnału (pomijam hipotetyczne zjawiska kwantowe tunelowania pod horyzontem), czyli nie wie co tam się dzieje, lecz przynajmniej wie o jego istnieniu, bowiem ciała wrzucone do czarnej dziury nigdy nie wracają. Ponadto rozszerzenie analityczne prowadzi do zaskakującego wyniku: czasoprzestrzeń zawiera drugi obszar zewnętrzny, całkowicie symetryczny do pierwszego, znajdujący się „po drugiej stronie” obszarów wewnętrznych. Drugi obszar zewnętrzny nie ma żadnej łączności kauzalnej (sygnałami nie szybszymi od światła) z pierwszym, zatem jest empirycznie niewykrywalny – jego istnienie nie ma żadnego wpływu na zjawiska fizyczne w pierwszym obszarze i jest aktem wiary w sprawczą moc matematyki.

W przypadku naładowanej elektrycznie czarnej dziury (czasoprzestrzeń Reissnera–Nordströma) i dziury wirującej (czasoprzestrzeń Kerra) maksymalne rozszerzenie analityczne zawiera nieskończenie wiele obszarów zewnętrznych i wewnętrznych.

2. Fizyczne istnienie innych obszarów zewnętrznych w maksymalnym rozszerzeniu analitycznym danego rozwiązania budzi wątpliwość nie tylko ze względu na brak powiązania kauzalnego z nimi. (Być może fizyka kwantowa dostarczy takiego związku). W przypadku czarnych dziur te rozszerzenia analityczne są niestabilne ze względu na ich ładunek i moment pędu. Weźmy wieczną czarną dziurę (nie powstała w wyniku kolapsu gwiazdy), która nie ma ładunku i nie wiruje; tworzy ona czasoprzestrzeń Schwarzschilda z dwoma obszarami zewnętrznymi

i dwoma wewnętrznymi. Wprowadźmy do niej jeden elektron. W wyniku powstanie naładowana czarna dziura, która od neutralnej różni się fizycznie tym, że w obszarze zewnętrznym występuje znikomo słabe pole elektryczne, natomiast matematycznie różni się od niej zasadniczo: ma nieskończenie wiele obszarów zewnętrznych, wewnętrznych i osobliwości, które są odmienne od dwu osobliwości Schwarzschilda. Trudno uwierzyć, że wprowadzenie ładunku jednego elektronu do czarnej dziury o masie ciężkiej gwiazdy tak drastycznie zmieni jej czasoprzestrzeń. Tak samo jest w przypadku wirującej czarnej dziury: dla dowolnie małego momentu pędu dostajemy rozszerzenie analityczne Kerra, a w granicy znikającego krętu ta czasoprzestrzeń skokowo przekształca się w czasoprzestrzeń Schwarzschilda. To zapewne niefizyczne „przejście fazowe” jest spowodowane tym, że konstrukcja rozszerzenia analitycznego jest odmienna w obecności ładunku elektrycznego i gdy go nie ma; podobnie jest w sytuacji różnego od zera momentu pędu i bez niego.

Wydaje się, że Hawking i Ellis (i wielu innych) przykładają nadmierną wagę do ścisłych rozwiązań. W przyrodzie ścisłe rozwiązania równań fizyki zdarzają się rzadko, jeśli w ogóle. Proste rozwiązanie równań Maxwella, takie jak płaska monochromatyczna fala elektromagnetyczna, jest tylko idealizacją sytuacji realnej i nie obserwujemy jej; takiej fali nie sposób dokładnie wytworzyć i w obszarze (teoretycznie nieskończonym) gdzie miałyby się propagować, zawsze są jakieś słabe pola od rozmaitych odległych źródeł. Rzeczywistość jest zawsze bardziej

złożona. Aby uniknąć nieporozumień, należy odróżniać ściśle prawa fizyki (ściśle równania) od ścisłych rozwiązań. Prawa fizyki, przynajmniej w dobrych (a nie tylko „efektywnych”) teoriach uważamy za ściśle, np. za ściśle uważamy równania Maxwella elektrodynamiki klasycznej (ta ścisłość jest ograniczona istnieniem teorii nadrzędnej – elektrodynamiki kwantowej) i na ich podstawie twierdzimy, że masa spoczynkowa fotonu jest dokładnie równa zeru, a nie, że jest tylko tak mała, że jej nie możemy zmierzyć. Przez ściśle rozwiązanie równań rozumiemy dokładne ich rozwiązanie, które jest nam dostępne, bowiem spełnia uproszczone warunki brzegowe i początkowe i to najczęściej takie, że mogą przybliżać te realistyczne warunki zachodzące w rzeczywistym świecie. W tym sensie takie rozwiązanie ściśle jest przybliżeniem rzeczywistości. Innymi słowy, sytuacja rzeczywista jest też opisana rozwiązaniem dokładnym, lecz odpowiadające mu warunki początkowe i brzegowe są tak skomplikowane, że rozwiązania tego nie znamy i nie znajdziemy, bo jest zbyt złożone. Mówiąc zatem, że rzeczywistość opisujemy w sposób przybliżony, mamy na myśli przybliżony opis warunków początkowych i brzegowych i wynikający z tego przybliżenia wybór dokładnego rozwiązania, a nie konstrukcję przybliżonego rozwiązania równań. (Inna rzecz, że równania fizyki są przeważnie tak skomplikowane, iż w wielu procesach decydujemy się na uproszczenie równań i posługujemy się rozwiązaniami dokładnymi równań uproszczonych, które tym samym są rozwiązaniami przybliżonymi równań dokładnych). Z tą sytuacją mamy niemal zawsze do czynienia w OTW. Pole

Schwarzschilda jest ścisłym rozwiązaniem równań Einsteina przy założeniu, że pole to jest wytworzone przez idealnie kulistą i dokładnie nieruchomą gwiazdę i poza nią nie ma żadnej innej materii. Pole to jest bardzo dobrym przybliżeniem, tym niemniej tylko przybliżeniem, rzeczywistego pola w Układzie Słonecznym (zawierającym planety i mnóstwo ciał drobniejszych). Czasoprzestrzeń Robertsona–Walkera i konkretne rozwiązania w postaci modeli Friedmanna są ścisłe, a zarazem są tylko przybliżeniem rzeczywistego Wszechświata. Rozwiązanie ściśle opisujące Wszechświat, biorące pod uwagę położenia i ruchy wszystkich gwiazd, planet, obłoków gazu i pyłu i wszelkich innych ciał materialnych, jest tak skomplikowane, że nigdy go nie poznamy. To bardzo szczęśliwa dla nas okoliczność, że to nieznane rozwiązanie daje się dobrze przybliżyć prostymi modelami Friedmanna. To, że kosmologia ze swej istoty operuje przybliżonym opisem Wszechświata, notorycznie uchodzi uwagi w dyskusjach o jej podstawach.

Wracając do powyższej definicji Wszechświata nasuwa się pytanie: czy maksymalne rozszerzenie analityczne rozwiązania opisującego rzeczywisty Wszechświat daje się dobrze przybliżyć modelami Friedmanna? Przykład czarnej dziury Schwarzschilda oraz wolno wirującej lub słabo naładowanej czarnej dziury pokazuje, że tak być nie musi. Ta definicja może zatem prowadzić do fałszywego opisu Wszechświata.

3. Akceptujemy ideę, że definicja Wszechświata nie jest empiryczna, lecz jest pewną (elegancką) konstrukcją w ramach ak-

tualnie uznawanej teorii grawitacji. Jeżeli OTW zostanie zastąpiona teorią bardziej uniwersalną, np. kwantową teorią grawitacji, to odpowiednio zmieni się też ta definicja i podpadający pod nią obiekt będzie zapewne znacznie różnić się od tego, co obejmuje definicja Hawkinga i Ellisa. Czegoś takiego normalnie w fizyce nie było. Dla przykładu: atom według mechaniki kwantowej ma właściwości istotnie różne od hipotetycznego atomu, o którym mówiła kinetyczna teoria gazów w połowie XIX wieku, jednak w obu przypadkach chodzi o ten sam obiekt materialny, o którym dziś wiemy nieporównanie więcej niż półtora wieku temu. Zachodzi obawa, że Wszechświat ponownie staje się konstrukcją intelektualną, luźno związaną z rzeczywistością (a co to jest rzeczywistość?), że fizycy-teoretycy usiłują coś wmówić w świat realny, niczym politycy w wyborców.

Czy zatem należy odrzucić definicję Hawkinga i Ellisa i przyjąć którąś z poprzednich, czy też trzymać się jej i stale pamiętać o powyższych zastrzeżeniach, by nie wyprowadziła nas na manowce? To jest problem otwarty.

Definicja H–E przez swój radykalizm ujawnia z całą mocą dwie kwestie, które są obecne w pozostałych definicjach Wszechświata, lecz są tam mniej eksponowane, lub wręcz ukryte. Po pierwsze, pewna część Wszechświata może nam być pryncypialnie niedostępna empirycznie: nie dostaniemy z niej żadnego sygnału fizycznego, ani nie możemy do niej żadnego sygnału wysłać. Zdając sobie z tego sprawę, niektórzy badacze już dość dawno temu wprowadzili pojęcie *Metagalaktyki* – jest

to ta część całego Wszechświata, która jest nam aktualnie dostępna empirycznie (eksperymentem i obserwacją). *Wszystkie prawa fizyki i teorie Wszechświata testujemy w Metagalaktyce, a nie w całym Wszechświecie*. Metagalaktyka rośnie wraz z postępem wiedzy fizycznej:

- do końca XVI wieku był nią tylko Układ Słoneczny,
- do końca XVIII wieku rozrosła się o pobliskie gwiazdy,
- na początku XX wieku objęła niemal całą Drogę Mleczną,
- obecnie sięga aż po powierzchnię ostatniego rozproszenia, na której powstało promieniowanie reliktowe docierające teraz do Ziemi (faktycznie sięga w przeszłość aż do epoki pierwotnej nukleosyntezy).

Wielu fizyków uważa, że wychodzenie (konceptualne) poza Metagalaktykę nie ma sensu i dostarcza wiedzy pozornej. Ta kwestia jest doniosła, bowiem modna w pewnych kręgach teoria strun implikuje koncepcję *wiełoświata* i nią się głównie zajmuje, mimo że tworzące wiełoświat „podwszechświaty” podlegają odmiennym prawom fizyki i nie wchodzą w żadne oddziaływania z naszym podwszechświatem, zatem ich istnienie jest dla Metagalaktyki zupełnie obojętne i na odwrót, wiedzy o tych podwszechświatach zawartej w teorii strun nigdy nie zweryfikujemy, jest więc to metafizyka bez transcendencji.

Po drugie, według OTW jest nieskończenie wiele matematycznych wszechświatów, czyli rozwiązań równań pola o cha-

rakterze kosmologicznym, a tylko jeden z nich istnieje fizycznie. Tak samo jest w innych teoriach grawitacji i zapewne tak będzie też w hipotetycznej teorii kwantowej grawitacji. Teoria jest więc ogromnie nadmiarowa, a więc nieadekwatna do rzeczywistości. To jest stara idea: skoro Wszechświat jest jeden, to konieczna jest teoria, która dopuszcza tylko jeden jego stan – ten, który jest realizowany w przyrodzie. Tylko taka teoria będzie adekwatna do tego, co opisuje. Takiej teorii nie ma i najprawdopodobniej nigdy nie będzie. Rzecz w tym, że całe przyrodoznawstwo opiera się na założeniu, że liczba obiektów opisywanych przez jakąkolwiek teorię nie jest z góry ograniczona. Z fizyki jądrowej wynika, że liczba pierwiastków chemicznych mających trwałe izotopy jest ograniczona, natomiast liczba atomów każdego z nich jest nieograniczona. Teoria wszechświatów ma tylko jeden desygnat. Jak budować teorię dla jednego obiektu? Uczni, którzy chcieliby się podjąć tego zadania, musieliby cofnąć się epistemologicznie przed całe nowożytne przyrodoznawstwo, przed Galileusza i zapewne przed Kopernika, czyli zacząć całkowicie od początku, od zera. Można się w tym dopatrzyć dalekiej analogii do teologii, która też ma tylko jeden desygnat – Boga. A jednocześnie poszukiwana teoria Wszechświata musiałaby jakoś nawiązywać do fizyki takiej, jaką teraz znamy. Jest to psychologicznie i intelektualnie niemożliwe. (Warto wspomnieć, że w ostatnich dziesięcioleciach parę razy odzywały się głosy: „kłopoty z teorią unifikującą wszystkie oddziaływania, w tym grawitację, i jednolicie opisującą całą materię biorą się stąd, że fizyka poszła w niewłaściwą stronę. Trzeba fizykę

zbudować na nowo od podstaw”. Oczywiście takie próby szybko kończyły się niepowodzeniem).

Wnioskujemy stąd, że osiągnęliśmy granicę stosowalności metody naukowej w fizyce: traktuje ona Wszechświat jak inne obiekty fizyczne, tymczasem on jest jedyny.

5. Kłopoty kosmologii fizycznej

W poprzednim rozdziale zobaczyliśmy, że kosmologia generuje fundamentalne problemy epistemologiczne. Kosmologowie (fizycy i astronomowie) przechodzą nad nimi do porządku dziennego stosując wspomnianą na początku poprzedniego rozdziału metodologiczną zasadę „problem dostrzegamy wtedy, gdy dysponujemy narzędziami do rozwiązania go” i badają Wszechświat jak każdy inny obiekt astronomiczny (bierne obserwacje dominują nad czynnym eksperymentem). Jednak ta minimalistyczna, pozytywistyczna postawa nie chroni przed kolejnym ciągiem problemów poznawczych, w odróżnieniu od tamtych wymagających pilnego rozwiązania.

Z założenia opisujemy geometrię Wszechświata pewnym matematycznym modelem kosmologicznym, czyli obserwacyjnie umotywowanym ściśłym (w sensie podanym poprzednio) rozwiązaniem równań Einsteina i w czasoprzestrzeni tego modelu stosujemy (na tyle prawomocnie, na ile potrafimy) wiarygodne prawa fizyki (przede wszystkim dotyczące cząstek elementarnych) i wyciągamy najdalej idące ich konsekwencje.

Okazuje się, że konstruowanie w ten sposób opisu Wszechświata wymaga wprowadzenia nowej fizyki motywowanej tylko tym celem. Poszukiwania tej nowej fizyki idą w dwu głównych kierunkach.

Problem ciemnej materii

Obserwacje ruchów wirowych wielu galaktyk spiralnych wskazują, że ich całkowita masa jest blisko 10 razy większa od sumarycznej masy wszystkich gwiazd (czyli tego, co świeci). Większość tej niewidocznej materii nie może tworzyć obiektów znanych astronomii Układu Słonecznego i obszarów pobliskich: planet i planetoid, obłoków gazu i pyłu oraz skolapsowanych gwiazd. W tym niewidocznym składniku galaktyk dominuje *ciemna materia*², która nie jest zbudowana z nukleonów. Co więcej, ta ciemna materia winna występować nie tylko w obrębie galaktyk. Od kilkudziesięciu lat wiadomo, że gromady galaktyk nie są obiektami związanymi grawitacyjnie, jeżeli masy ich galaktyk są równe sumarycznej masie ich gwiazd. Innymi słowy, gromada takich „lekkich” galaktyk ma całkowitą energię dodatnią, zatem jest przypadkowym skupiskiem tych galaktyk, które przypadkowo spotkały się i za jakiś czas (mierzony w miliardach lat) rozbiegną się, każda w swoją stronę. Gromad jest jednak zbyt wiele i są zbyt wyraźne, by przypuszczać, że są

² Ta nazwa jest kalką z języka angielskiego (*dark matter*). Zgodnie z tradycją polskiej terminologii naukowej winno być *materia ciemna*.

przygodnymi zagęszczeniami roju galaktyk. Gromady stają się grawitacyjnie związane (ujemna energia grawitacyjna oddziaływań między nimi przeważa nad energią kinetyczną), jeżeli mają odpowiednio większą masę. Ciemna materia w galaktykach poprawia sytuację, lecz to jeszcze nie wystarczy, masa całej gromady musi być ok. pięć razy większa od sumy mas galaktyk z ciemną materią. Przypuszcza się dość powszechnie, że tę brakującą masę stanowi gaz ciemnej materii wypełniający obszar całej gromady pomiędzy galaktykami, jest więc go dużo więcej niż w samych galaktykach.

Kosmologowie przyjęli życzliwie koncepcję ciemnej materii, bowiem pomaga ona wyjaśnić jak w pierwotnej jednorodnej plazmie wczesnego Wszechświata powstały gwiazdy i galaktyki. Jeżeli już na tych wczesnych etapach ewolucji istniały obszary zagęszczonej ciemnej materii, to jej siły grawitacyjne ściągały zwykłą materię (nukleony) do tych obszarów i przyspieszały jej kondensację w protogwiazdy.

Ale czym jest ciemna materia? Jedyna sensowna hipoteza głosi, że są to trwałe cząstki z masą spoczynkową, które oddziałują tylko grawitacyjnie i słabo, i które obecnie są nierelatywistyczne. Kłopot w tym, że takie cząstki zupełnie nie pasują do Standardowego Modelu Cząstek: nie ma w nim miejsca dla nich i trzeba go rozszerzyć specjalnie dla ich przyjęcia, co psuje jego spójność. Laboratoryjnie nie mamy jak dotąd żadnego sygnału istnienia takich cząstek.

Hipoteza istnienia ciemnej materii stawia relację fizyki do astronomii w nowej sytuacji. Jedynie u samego zarania nauki

nowożytnej, na początku powstawania fizyki, astronomia ją inspirowała. Galileusz, Kepler i Newton tworzyli podwaliny fizyki ziemskiej opierając się na obserwacjach astronomicznych. Było to w pełni zasadne: zjawiska astronomiczne na ogół przebiegają w układach dobrze izolowanych od otoczenia, zatem zjawiska te nie są zakłócanie przez wpływy zewnętrzne, a pierwsi fizycy nie potrafili izolować w laboratorium badanego obiektu od otoczenia. Gdy fizyka trochę okrzepla, przez następne trzysta lat rozwijała się autonomicznie, bazując na laboratorium, a astronomia była biernym konsumentem jej osiągnięć (mechanika nieba, potem spektroskopia i modele astrofizyczne). Od lat osiemdziesiątych XX wieku astronomia ponownie, teraz poprzez kosmologię, inspirowuje fizykę fundamentalną. Inspiracja ta nie ogranicza się do kwestii ciemnej materii. Jak zauważył czterdzieści lat temu Jakow Zeldowicz, Wielki Wybuch był gigantycznym akceleratorem, który wprawdzie działał tylko przez ułamek sekundy, lecz przez tę krótką chwilę przyspieszył cząstki elementarne do energii daleko większych niż ziemskie akceleratory, więc kosmologia ma do zaoferowania fizyce cząstek dużo więcej: ustalenie liczby rodzajów neutrin, górna granica masy fotonu itp.

Problem ciemnej energii

W 1999 r. pojawiło się doniesienie dwu niezależnych grup badawczych, które zatrzęsło (a przynajmniej wydaje się, że zatrzęsło) Standardowym Modelem Kosmologicznym, czyli opisem fizyki Wszechświata w ramach czasoprzestrzennego modelu

Friedmanna. Nie wdając się w omawianie złożonych szczegółów, na co nie ma tu miejsca, można powiedzieć, że obserwacje (obecnie) ponad 500 supernowych typu Ia interpretuje się jako *przyspieszoną* ewolucję (ekspansję) Wszechświata. Według Modelu Standardowego Wszechświat wypełniony jest zwykłą materią (znaną z laboratorium) oraz ciemną materią, a te dwie wywołują *spowalniającą*, a nie przyspieszającą ekspansję przestrzeni. Ostrożnie należy powiedzieć, że obserwacje te są niezgodne z Modelem Standardowym, lecz powód niezgodności nie jest pewny. Nie jest dowiedzione, że jest to skutek akceleracji kosmicznej ekspansji – taka interpretacja może być błędna. Jesienią 2011 roku, po przyznaniu szefom obu grup Nagrody Nobla z fizyki „za odkrycie przyspieszonej ekspansji Wszechświata” pojawiły się głosy poważnych fizyków, że była to nagroda przedwczesna, bowiem coś odkryto, ale nie jest jasne co.

Wyjaśnieniem rozbieżności pomiędzy obserwacjami supernowych typu Ia, a przewidywaniami Standardowego Modelu Kosmologicznego, alternatywnym do przyspieszonej ekspansji kosmicznej, są efekty rozchodzenia się światła w przestrzeni nierównomiernie zakrzywionej wskutek niejednorodnego rozmieszczenia materii. Teza, że ewolucja przyspiesza, opiera się na założeniu, że żyjemy w świecie opisanym płaskim modelem Friedmanna, czyli że ignorujemy niejednorodności materii. Jak duże mogą być skutki tych niejednorodności? Jak mówiłem poprzednio, realny Wszechświat jest opisany ścisłym rozwiązaniem równań Einsteina, ale dla tak skomplikowanych warunków brzegowych i początkowych, że nigdy tego rozwiązania nie

poznamy i zamiast niego posługujemy się rozwiązaniem Friedmanna, które jest przybliżeniem w tym sensie, że jest rozwiązaniem ścisłym dla warunków uproszczonych. Przybliżeniem tego nieznanego rozwiązania lepszym niż model Friedmanna byłoby rozwiązanie otrzymane w wyniku wyśredniowania rzeczywistego rozmieszczenia materii. Ponieważ równania Einsteina są nieliniowe, nie jest jasne jak wykonywać w nich operację średniowania; problem jest tak złożony, że nie mogę nic więcej o nim tu powiedzieć. Dwie grupy badaczy otrzymały sprzeczne wyniki: jedna grupa twierdzi, że istniejące niejednorodności wystarczą, by imitować akcelerację doskonale jednorodnego świata, druga utrzymuje, że te niejednorodności są zbyt małe, by taki efekt uzyskać. Musimy poczekać na rozstrzygnięcie tego sporu.

Dodajmy, że Andrzej Kasiński z Warszawy wykazał, iż w prostym niejednorodnym modelu kosmologicznym, takim jak wszechświat Lemaître’a, niejednorodności materii imitują przyspieszoną ekspansję modelu Friedmanna (Kasiński, 2014).

Jeżeli przybliżenie modelem Friedmanna jest dobre i akceleracja jest efektem rzeczywistym, to możemy ją wyjaśniać na trzy sposoby.

1. Stała kosmologiczna Λ

Jak wiemy, Einstein wprowadził człon kosmologiczny ze stałą Λ do równań pola po to, by uzyskać *statyczny* model Wszechświata i gdy obserwacje jednoznacznie wskazały, że Wszechświat ewoluje, odrzucił ten człon bez żalu. W latach siedemdziesiątych

XX wieku zorientowano się, że powszechnie uznawana za poprawną metoda konstruowania równań pola grawitacyjnego, daje równania Einsteina z tym członem, zatem stała Λ jest uniwersalną stałą przyrody wbudowaną w nasz świat. Jeżeli obserwacje w Układzie Słonecznym i kosmologiczne wskazują – jak wtedy sądzono – że $\Lambda = 0$, to nie wystarczy przyjąć tego do wiadomości, jak Einstein, lecz trzeba uzasadnić z zasad pierwszych dlaczego ta stała znika. Stała kosmologiczna jęła straszyć w samym centrum fizyki. Podejmowane przez ponad dwie dekady przez najwybitniejszych fizyków próby wykazania, że musi być $\Lambda = 0$ zakończyły się fiaskiem. W głośnym artykule przeglądowym Steven Weinberg napisał w 1989 r. „Problem stałej kosmologicznej to najważniejszy problem fizyki fundamentalnej” (Weinberg, 1989). W równaniach Einsteina dodatnia stała kosmologiczna działa jak materia ze stałą gęstością energii i z równym jej (co do modułu) ujemnym ciśnieniem. Dodatnie ciśnienie dodaje się do gęstości energii i spowalnia rozszerzanie się Wszechświata, natomiast ujemne ciśnienie działa jak siła odpychająca i przyspiesza ekspansję, zatem najprostsze wyjaśnienie pociemnienia setek supernowych w czasoprzestrzeni Friedmanna to istnienie dodatniej stałej kosmologicznej. Na tej podstawie powstał fenomenologiczny *konkordantny model kosmologiczny Λ CDM*, który zakłada istnienie nierelatywistycznej ciemnej materii w galaktykach i ich gromadach oraz odpowiednio dopasowaną stałą kosmologiczną. Model ten dobrze pasuje do wszystkich obserwacji. Potwierdziły go najnowsze obserwacje wykonane przez satelitę Planck Euro-

pejskiej Agencji Przestrzeni Kosmicznej (ESA), który mierzył anizotropię multipolową promieniowania relikowego (CMB), opublikowane w marcu 2013³. Ich konkluzja jest wyraźna:

„To the extremely high accuracy the power spectrum of CMB is compatible with the predictions of the Λ CDM cosmology... There is no strong evidence that the dark energy is anything other than a cosmological constant”. (arXiv:1303.5076) (To ostatnie zdanie ukazuje, że techniczny żargon rozumiany literalnie brzmi śmiesznie).

Model jest fenomenologiczny, tzn. w miarę prosto i spójnie opisuje obserwacje bez wnikania głębiej w naturę fizyczną zachodzących zjawisk. Astronomom to najczęściej wystarcza, natomiast fizykom nie podoba się, że stała kosmologiczna musi być starannie dopasowana. Jeżeli tę dopasowaną wartość Λ przeliczyć na gęstość energii, to dostaje się liczbę co do rzędu wielkości równą gęstości energii materii nukleonowej i ta zbieżność jest zdumiewająca, bowiem pierwsza liczba jest stała, a gęstość energii materii maleje z czasem i obie wielkości winny być całkowicie niezależne. To jest *problem koincydencji*. Jeżeli dwie niezależne wielkości są (w przybliżeniu) równe, to żyjemy w wyróżnionej epoce. Dlaczego? Z tym problemem można od biedy jakoś się uporać, istotniejsza jest inna trudność: należy z zasad pierwszych fizyki wyliczyć tę dopasowaną wartość Λ . Powszechnie uważa się, że w fizyce fundamentalnej mamy

³ Jednocześnie opublikowano 29 obszernych artykułów o pracy tego satelity.

trzy niezależne stałe przyrody: stałą Plancka \hbar , oznaczającą, że wszelka materia ma naturę kwantową, prędkość światła c , bo-
wiem materia jest relatywistyczna oraz stałą Newtona G , bo-
wiem wszelka materia oddziałuje grawitacyjnie. Z nich można
zbudować każdą wielkość wymiarową. W przypadku stałej ko-
smologicznej otrzymuje się z nich liczbę o ponad 120 rzędów
wielkości większą od obserwacyjnie dopasowanej wartości Λ ;
jak powtarzają wszyscy piszący o tym problemie, jest to trudny
do pobicia rekord rozbieżności pomiędzy teorią a doświad-
czeniem (obserwacją). Co więcej, jeżeli zbudowana w czaso-
przestrzeni Minkowskiego kwantowa teoria pola stosuje się
też (choć w przybliżeniu) w zakrzywionej czasoprzestrzeni
Friedmanna, to istniejące pola kwantowe dają do Λ wkłady dużo
większe niż ta wartość dopasowana i w wyliczeniu tej wartości
te wkłady muszą się wzajemnie dokładnie kasować. To jest pro-
blem *subtelnego zestrojenia*. Wydaje się, że o ile podejmowane
do 1999 r. zadanie wykazania z zasad pierwszych, że $\Lambda = 0$ jest
skrajnie trudne (i nikt mu nie podołał), to wykazanie po tej da-
cie, iż Λ ma taką wartość, jaką sugerują obserwacje, jest jesz-
cze trudniejsze.

2. Ciemna energia

Aby uniknąć problemu koincydencji, a przede wszystkim bez-
nadziejnych prób dokładnego wyliczenia stałej kosmologicz-
nej, wysunięto hipotezę, że wiodącym składnikiem kosmicz-
nej materii, odpowiedzialnym za przyspieszoną ewolucję, jest
ciemna energia – nowy, *niekorpuskularny* rodzaj materii, która

ewoluuje dynamicznie. Ta hipotetyczna forma materii, zwana też *kwintesencją* nie pasuje do Modelu Standardowego Cząstek jeszcze bardziej niż ciemna materia. W ciągu parunastu lat pojawiło się kilkaset prac zawierających najbardziej fantastyczne hipotezy, takie jak fantomy oraz gaz Czapłygina. Mam wrażenie, iż wielu autorów uznało, że w kosmologii można zrezygnować z twardych rygorów nauk empirycznych i ulecieć w zwienną krainę ułudy, a jedynym kryterium wartości artykułu jest to, czy da się go opublikować. Z kolei dziwaczne formy dynamicznej ciemnej energii generują dziwaczne osobliwości końca Wszechświata.

W ten sposób 95% materii Wszechświata stanowi ciemna energia (dominuje) oraz ciemna materia; zaledwie 5% to zwykła materia zbudowana z nukleonów i elektronów. Te dwie egzotyczne formy materii sugerują swoje istnienie wyłącznie poprzez kosmologię, bowiem fizyka laboratoryjna (doświadczenie i teoria) ich nie potrzebuje i są dla niej nader kłopotliwe. Zwłaszcza ciemna energia opiera się na wątej bazie niejednoznacznej interpretacji obserwacji supernowych Ia.

3. Modyfikacje ogólnej teorii względności

Najmniej popularna, lecz również reprezentowana przez kilkaset publikacji, jest modyfikacja dynamiki OTW. Odrzucamy ideę, że akceleracja Wszechświata jest skutkiem odpychającej grawitacji ciemnej energii i przypuszczamy, że jest ona wynikiem zmienionej dynamiki grawitacji zwykłej materii (i materii ciemnej). Taka hipoteza jest możliwa, bowiem fizyka zjawisk

grawitacyjnych jest jedynym działem fizyki, w którym jest nie-kończona liczba teorii, znanych i potencjalnych. Ta wyjątkowość bierze się stąd, iż zakres eksperymentów, jakie możemy wykonywać z grawitacją, jest wbrew pozorom nader wąski, zakres obserwacji (astronomicznych) jest nieco szerszy, lecz też bardzo skromny; by to sobie uświadomić, wystarczy porównać to ze zbiorem zjawisk elektromagnetycznych, jakie potrafimy wytwarzać i w pełni kontrolować. W rezultacie ten ubogi zestaw danych empirycznych można opisać za pomocą wielu teorii. Sytuacja jest dość paradoksalna, bowiem zjawiska grawitacyjne opisuje ogólna teoria względności, którą Lew Landau uznał za „najpiękniejszą teorię fizyki” i która bez wątpienia jest najwspanialszym dziełem intelektu ludzkiego. Rzecz w tym, że teoria ta jest podatna na rozmaite modyfikacje. Jest kanoniczna, czyli jest najprostsza w swojej konceptualnej i matematycznej wyrafinowanej złożoności (i niczego z niej odjąć nie można), a przez to daje się obudowywać przeróżnymi dodatkami i komplikacjami, które psują jej niezwykle piękno i które można skutecznie wyeliminować tylko przez porównanie z eksperymentem – a tego brakuje.

Pierwszą modyfikację zaproponował już w 1918 r. wybitny matematyk Hermann Weyl, a potem innym poszło gładko. Komplikacje idą we wszystkich możliwych do wyobrażenia kierunkach i zawsze – bez wyjątku – są to „wariacje na temat OTW”, bez teorii Einsteina żadna jej konkurentka nie powstałaby. We wszystkich dostępnych eksperymentach i obserwacjach OTW wypada najlepiej, lecz to za mało, by pozostać jedyną. Sytuację

komplikuje fakt, że ubóstwo danych empirycznych powoduje, iż interpretacja fizyczna wielu alternatywnych teorii grawitacji jest niejednoznaczna i nie można ich w oparciu o te dane sfałsyfikować. Z drugiej strony, w tym nieskończonym zbiorze teorii grawitacji OTW jest wyróżniona nie tylko historycznie i nie tylko swoją kanoniczną prostotą; rzecz jest bardzo skomplikowana i nie mogę nic więcej tutaj powiedzieć⁴.

Powstaje naturalne pytanie: po co odwoływać się do alternatywnych teorii grawitacji z ich słabościami i cieszyć się, że niektóre z nich dają pojedyncze rozwiązania (które mogą być wyjątkowe, a zatem niestabilne) imitujące przyspieszoną ewolucję Wszechświata, zamiast założyć, że akceleracja jest sterowana w ramach OTW jakąś nieznaną formą materii (np. ciemną energią)? Rzec w tym, że o materii eksperymentalnie wiemy dużo, a ciemna energia musi być egzotycznym polem klasycznym, nie pasującym do Modelu Standardowego Cząstek i łamiącym fundamentalny dogmat współczesnej fizyki głoszący, iż wszelkie pola materii są skwantowane. Pole grawitacyjne jest klasyczne i nie jest jasne, czy należy je kwantować, jest niezależne od Modelu Standardowego i znamy je empirycznie na tyle słabo, że dopuszczamy rozważanie teorii alternatywnych do OTW. Alternatywna teoria grawitacji jest dla fizyki ideą bardziej konserwatywną niż ciemna energia. W tej chwili kosmologia jest głównym odbiorcą alternatywnych teorii grawitacji.

⁴ Czytelnika bardziej zainteresowanego odsyłam do dwu spośród moich prac na ten temat (Magnano i Sokołowski, 1994; Sokołowski, 2007).

6. Problem początku Wszechświata

Opisane w poprzednim rozdziale kłopoty kosmologii dotyczą opisu Wszechświata takiego, jaki jest dzisiaj: czy jest on wypełniony formą materii nieznaną fizyce laboratoryjnej. Kosmologia ze swej istoty jest opisem nie tylko świata dzisiejszego, lecz jest też *kosmogonią* – historią Wszechświata, obejmującą jego narodziny, jak to przewiduje OTW. Standardowy model Friedmanna głosi, że ewolucja zaczyna się od *początkowej osobliwości czasoprzestrzeni* (Big Bang – Wielki Wybuch). Osobliwość ta jest osobliwością krzywizny: czasoprzestrzeń ma brzeg będący trójwymiarową hiperpowierzchnią, na której krzywizna czasoprzestrzeni jest nieskończona, czyli działają tam nieskończone siły pływowe rozrywające każde, nawet najmniejsze ciało, na kawałki. W osobliwości załamuje się samo pojęcie czasoprzestrzeni, czyli areny, na której rozgrywają się wszystkie zjawiska fizyczne. Z tego powodu model Friedmanna przez kilkadziesiąt lat budził opory fizyków: sądzono, że ta osobliwość jest sztucznym wytworem wysokiej symetrii rozmieszczenia materii; gdyby realistycznie założyć nierównomierne rozmieszczenie materii, to osobliwość zniknie i „na początku” (cokolwiek by to miało znaczyć) materia miała wysoką, lecz skończoną gęstość. Dopiero w latach 1968–70 Stephen Hawking i Roger Penrose udowodnili ciąg twierdzeń o osobliwościach, które można krótko streścić: *czasoprzestrzeń spełniająca fizycznie realistyczne warunki zawiera gdzieś osobliwość*. Osobliwości nie są wytworem wysokiej symetrii, są pospo-

lite, to czasoprzestrzenie bez osobliwości są nietypowe i rzadkie. W osobliwości kończy się regularna czasoprzestrzeń, a tym samym nasza zdolność opisu procesów fizycznych. To, co się dzieje w osobliwości, jest poza naszym zasięgiem. *Osobliwość czasoprzestrzeni stanowi kres poznania naukowego*. OTW jest pierwszą i jak dotąd jedyną teorią naukową, z której wynikają jej własne granice, które stają się nieprzekraczalną granicą nauki jako takiej. Żeby nie było nieporozumień: hydrodynamika i termodynamika fenomenologiczna mają granicę wyznaczoną warunkiem, że dotyczą ciągłej materii w makroskopowej ilości, tak że jej atomistyczna natura jest niezauważalna. Lecz granica ta jest na nie nałożona z zewnątrz i teorie te nie wytwarzają jej same z siebie, tzn. nie wynika z nich, że mikroskopowe porcje materii mają naturę korpuskularną i kwantową. Podobnie, teorie nierelatywistyczne są wewnętrznie spójne dla dowolnie dużych prędkości i nie sugerują potrzeby modyfikacji przy relatywistycznych prędkościach. Istnienie osobliwości czasoprzestrzeni nie jest postulowane poza OTW, lecz jest wynikiem jej dynamiki.

Oprócz samej osobliwości, niedostępnej poznaniu, mamy problemy z procesami, które zachodziły tuż po Wielkim Wybuchu. Przedstawiam je kolejno cofając się w czasie.

1. Era Wielkiej Unifikacji

Była krótka, przypuszcza się, że zaczęła się około 10^{-42} s po Wielkim Wybuchu i trwała do około 10^{-34} s po nim. W tej erze zapewne obowiązywały hipotetyczne teorie Wielkiej Unifikacji (GUT) oddziaływań fundamentalnych (bez grawitacji). Przypuszczalnie zaszły wtedy dwa ważne procesy: *bariogeneza* i *inflacja*. Bariogeneza to proces, w którym powstało więcej materii niż antymaterii. Materia i antymateria mają symetryczne własności i gdyby we wczesnym Wszechświecie powstały w dokładnie równych ilościach, to potem zanihilowałyby się bez reszty w promieniowanie i dzisiaj Wszechświat składałby się tylko z fotonów, nie byłoby gwiazd i planet. Tu interesuje nas inflacja kosmiczna.

Przypuszcza się, że w tej erze miała miejsce *epoka inflacyjna: krótki okres bardzo szybkiego (eksponencjalnego) rozszerzania się Wszechświata*. Pierwotnie (Alan Guth, 1981) inflacja miała tłumaczyć dlaczego Wszechświat jest bardzo szczególnie – dlaczego pasuje do niego przestrzennie płaski model Friedmanna, czyli wyjątkowy model w nieskończonym zbiorze czasoprzestrzeni Friedmanna. To się nie udało. Obecnie hipoteza inflacji jest atrakcyjna, bowiem generuje zaburzenia rozmieszczenia materii konieczne do powstania galaktyk. Wiara w to, że inflacja miała miejsce, opiera się na kwantowej teorii pola w czasoprzestrzeni płaskiej. Kłopot w tym, że do dziś nie udało się skonstruować przekonującego modelu kosmicznej inflacji. Zwykle zakłada się, że szybka ekspansja Wszechświata napę-

dzana była energią specyficznego, postulowanego wyłącznie do tego celu, kwantowego *pola inflatonowego*. Podobnie jak ciemna materia i ciemna energia, inflaton nie mieści się w Modelu Standardowym Cząstek i stanowi kolejną hipotetyczną formę materii narzucaną fizyce przez kosmologię. Inflaton, by spełnić swoją rolę, musi mieć specyficzne własności, których nie sposób uzasadnić niezależnie od tego celu. Po przeszło trzydziestu latach intensywnych badań nie udało się skonstruować standardowego modelu ewolucji inflacyjnej, który w przybliżeniu opisywałby postulowane cechy hipotetycznej epoki inflacyjnej. Fundamentalny kłopot tkwi w tym, że model inflacji usiłuje się zbudować w ramach kwantowej teorii pola poza wiarygodnym zakresem jej stosowalności. Kwantowa teoria pola dobrze działa w czasoprzestrzeni Minkowskiego. W erze Wielkiej Unifikacji krzywizna czasoprzestrzeni była duża, niestety stworzenie kwantowej teorii pola w silnych polach grawitacyjnych napotkało zasadnicze problemy conceptualne i teoria ta pozostała w załężku. W rezultacie dynamikę kwantowego dylatonu rozpatruje się faktycznie w płaskiej czasoprzestrzeni wierząc, że silna krzywizna nie wprowadza istotnych zmian jakościowych. Ponieważ nie potrafimy wytwarzać silnych i szybko zmiennych pól grawitacyjnych, wiara ta jest i jeszcze długo będzie niealfifikowalna. Zapewne z tego powodu wiara w to, że epoka inflacyjna miała miejsce, jest dość rozpowszechniona i tylko nie-liczni ją kwestionują.

W trakcie redagowania tego artykułu historia dopisała nowy rozdział badań inflacji. W marcu 2014 roku zespół badawczy

BICEP2 ogłosił wyniki badań polaryzacji promieniowania relikтового wskazujące na istnienie pierwotnych fal grawitacyjnych, które powstały pod koniec epoki inflacyjnej, gdy pole inflatonowe rozpadało się na zwykłe cząstki elementarne. Sukces był podwójny: w promieniowaniu reliktowym „zobaczono” fale grawitacyjne (których ziemskie laboratoria od dziesięcioleci bezskutecznie poszukują), a ich obecność potwierdzała istnienie kosmicznej inflacji. Dwa miesiące później inny zespół amerykański przeanalizował te obserwacje i uznał, że rzekomy ślad fal grawitacyjnych w promieniowaniu reliktowym znacznie prościej jest wyjaśnić procesami fizycznymi zachodzącymi w Drodze Mlecznej. Na ostateczne rozstrzygnięcie, czy grupa BICEPa2 odkryła coś ważnego, czy też popełniła fatalną dla siebie pomyłkę, trzeba będzie poczekać kilka miesięcy; w każdym razie zarzuty wobec interpretacji „inflacja i fale grawitacyjne” są na tyle mocne, iż stanowczy głos zabrał Paul Steinhardt, jeden z autorów tzw. „nowego modelu inflacyjnego” (1982). Cytuję:

„Niektórzy zwolennicy teorii inflacji kosmicznej, którzy świętowali odkrycie BICEPa2, nadal twierdzą, że teoria ta jest słuszną niezależnie od tego, czy pierwotne fale grawitacyjne zostały wykryte, czy nie... Ich uzasadnienie jest alarmujące: koncepcja inflacji jest tak giętka, że jest odporna na wszelkie testy eksperymentalne i obserwacyjne. Po pierwsze dlatego, że inflacja jest napędzana hipotetycznym polem inflatonowym, któremu można przypisać takie własności, by pasowały do każdego wyniku empirycznego. Po drugie dlatego, że inflacja nie kończy się

wytworzeniem jednolitego wszechświata, lecz w nieunikniony sposób prowadzi do wieloświata (*multiverse*) złożonego z nieskończonej liczby pęcherzyków (podwszechświatów), z których każdy ma inne własności fizyczne i kosmologiczne. To, co obserwujemy, stanowi tylko fragment jednego pęcherzyka w całym wieloświecie. Gdy się przebiega wszystkie te pęcherzyki, to wszystko, co może zdarzyć się fizycznie, faktycznie zdarza się w nieskończenie wielu pęcherzykach. Żaden eksperyment nie może wykluczyć teorii, która dopuszcza wszystkie możliwe wyniki... Jasno widać, że paradygmat inflacyjny jest fundamentalnie nieweryfikowalny, a zatem naukowo bezwartościowy” (Steinhardt, 2014, s. 9).

Dla jasności warto dodać, że Steinhardt po latach pracy nad modelem inflacyjnym zmienił radykalnie poglądy i ta porażka tego modelu jest mu na rękę, jednak jego zarzuty pozostają w mocy niezależnie od jego przekonań naukowych⁵.

⁵ Uwaga dodana w korekcie. Na przełomie 2014 i 2015 roku podejścia wielu badaczy okazały się słuszne. Nieznaczną polaryzację promieniowania relikтового nie trzeba wyjaśniać działaniem pierwotnych fal grawitacyjnych powstałych w epoce inflacyjnej, znacznie prościej wyjaśnia się ją procesami astrofizycznymi w Drodze Mlecznej. Nie po raz pierwszy i zapewne nie po raz ostatni ważne odkrycie w astronomii pozagalaktycznej okazuje się wytworem błędów systematycznych w obserwacjach lub nadinterpretacji obserwacji.

2. Era kwantowej grawitacji

Jeżeli Wszechświat wyłonił się z pierwotnej osobliwości (Wielkiego Wybuchu), to bezpośrednio potem energia i gęstość materii były dowolnie duże (praktycznie nieskończone), a wówczas nie obowiązywały znane nam prawa fizyki, lecz dominowały zjawiska hipotetycznej kwantowej grawitacji (QG). Pogląd ten opiera się na dwu hipotezach:

- 1) ponieważ grawitacja jest uniwersalnym oddziaływaniem wszelkiej materii i materia ma naturę kwantową, to również *grawitacja ma naturę kwantową*,
- 2) zjawiska QG są istotne dla cząstek elementarnych mających energie rzędu 10^{19}GeV i odległych od siebie o 10^{-33}cm , a to było możliwe tuż po Wielkim Wybuchu.

Druga hipoteza wywodzi się z fundamentalnej roli przypisywanej tzw. skali Plancka, zbudowanej z uniwersalnych stałych przyrody, \hbar , c i G , która do znanej nam fizyki zupełnie nie pasuje. Pierwsza hipoteza brzmi bardzo przekonująco i jest szeroko akceptowana, chociaż ostatnio są badacze kwestionujący ją (zwolennicy *emergentnej koncepcji grawitacji*).

Myśl, że oddziaływanie grawitacyjne ma naturę kwantową, podobnie jak elektromagnetyczne, pierwszy wyraził Einstein w 1918 r., w latach trzydziestych podjął ją Mark Bronsztejn w ZSRR (zamordowany na rozkaz Stalina), a pod koniec lat czterdziestych systematyczne badania w tym kierunku roz-

począł Paul Dirac. W ślad za nimi poszli niemal wszyscy najwybitniejsi fizycy zajmujący się oddziaływaniami fundamentalnymi. Bez cienia przesady można stwierdzić, że skonstruowanie kwantowej teorii grawitacji (zwanej krócej „kwantową grawitacją”) jest najbardziej ambitnym i najtrudniejszym zadaniem naukowym w dziejach ludzkości. Po prawie 70 latach wysiłków dużej grupy wielkich umysłów wyniki są mizerne, teoria ta w najlepszym razie jest w stadium załączkowym. Niepowodzenie to ma dwie przyczyny. Po pierwsze, nie znamy empirycznie żadnych zjawisk QG, nie mamy pojęcia na czym się oprzeć i czego się spodziewać, nie mamy więc żadnego zasadnego punktu startowego. Dla porównania: po opracowaniu szczególnej teorii względności Einstein uznał, że skoro zjawiska elektromagnetyczne mają naturę relatywistyczną, to podobnie musi być z grawitacją. Nie znał zjawisk, w których hipotetyczna relatywistyczna teoria grawitacji prowadzi do odstępstw od prawa powszechnego ciążenia, zwrócił natomiast uwagę na powszechnie znany i w fizyce nierelatywistycznej zupełnie przygodny fakt równości masy bezwładnej i ładunku grawitacyjnego wszystkich ciał. Niczym analogicznym przy konstrukcji teorii QG nie dysponujemy. Po drugie, przy formułowaniu tej teorii napotykamy olbrzymie, właściwie nie do pokonania, trudności koncepcyjne. Nie mogę ich tu omawiać, powiem tylko, że jeżeli teoria ta powstanie, to w niczym nie będzie przypominać elektrodynamiki kwantowej.

Dochodzimy do pesymistycznego wniosku: jeżeli druga hipoteza jest prawdziwa i zjawiska QG występują tylko w pobliżu

osobliwości krzywizny czasoprzestrzeni (Wielkiego Wybuchu oraz czarnych dziur) i nie dają bezpośrednich konsekwencji w obrębie dostępnych nam (obecnie) zjawisk, to zjawisk tych nigdy nie wytworzymy w laboratorium i nigdy nie sprawdzimy poprawności teorii, której tak usilnie poszukujemy. Skoro o nieznannej jeszcze teorii kwantowej grawitacji mamy wiedzę negatywną – że nie będzie bezpośrednio weryfikowalna, a tylko poprzez dalekie konsekwencje niesprzeczna z pozostałą fizyką – to czy wysiłki na jej skonstruowanie mają sens?

Powyższe pytanie sygnalizuje szerszy i fundamentalny problem: jaki jest status poznawczy teorii naukowej? Na stawiany często przez ludzi spoza środowiska naukowego zarzut, że teoria to tylko spekulacja umysłowa, zwykle oderwana od rzeczywistości, pewien myśliciel stwierdził, iż „nie ma nic lepszego i praktyczniejszego od dobrej teorii”. W naukach przyrodniczych, zwłaszcza w fizyce, teoria wyraża w niewielkiej liczbie twierdzeń (zatem dających się ogarnąć umysłem) wiedzę o skończonej liczbie znanych faktów i o nieskończonej liczbie faktów (zdarzeń) potencjalnych. Mówiąc językiem komputerowym: teoria to plik spakowany nieskończenie gęsto. Użyteczność teorii dotyczy przede wszystkim faktów potencjalnych, które – gdy o ich potencjalnym istnieniu dowiemy się z tej teorii – są nam dostępne empirycznie; w ten sposób teoria generuje technikę. Kładę nacisk na dostępność empiryczną, przynajmniej w zasadzie, tego nieskończonego zbioru faktów opisywanego teorią; bez niej teoria staje się w najlepszym razie katalogiem faktów znanych. Jeżeli zjawiska kwantowej grawitacji nigdy nie

będą nam dostępne empirycznie, to teoria QG będzie radykalnie różnić się rangą poznawczą od pozostałych teorii fizyki; nawet jeżeli wprowadzi systematyczny porządek do cząstek materii i ich oddziaływań, to jako swoisty „katalog” będzie zawsze konwencją podatną na zakwestionowanie.

Aby jaśniej omawiać ten i podobne problemy generowane głównie przez kosmologię, autorzy wspomnianego już nowego podręcznika kosmologii relatywistycznej (Ellis, Maartens i MacCallum, 2012) wprowadzili pojęcie *Horyzontu Fizyki*: *jest to koncepcja metodologiczna, która oddziela tę wiedzę fizyczną, którą zdobywamy i testujemy w laboratoriach ziemskich i kosmicznych, od spekulatywnej wiedzy teoretycznej, której nigdy nie sprawdzimy bezpośrednio w laboratoriach*. Sens tego rozróżnienia ilustruje przykład. Wyobraźmy sobie, że z jakichś powodów nie jesteśmy w stanie wykonać żadnych eksperymentów, w których ujawniają się efekty relatywistyczne: nie wykonujemy pomiarów typu eksperymentu Michelsona-Morleya, nie mierzymy energii relatywistycznych elektronów, nie mamy systemu GPS itd. Mamy natomiast mechanikę kwantową i Einstein formułuje szczególną teorię względności i wykazuje, że w połączeniu z teorią kwantów przewiduje ona istnienie antycząstek i znajdujemy pozyton. Czy to wystarczyłoby, żebyśmy uwierzyli w słuszność STW? *Horyzont Fizyki ogranicza naszą znajomość praw fizyki rządzących wczesną ewolucją Wszechświata*. Możemy jedynie badać konsekwencje hipotetycznych praw obowiązujących w erze kwantowej grawitacji i (przypuszczalnie) w erze Wielkiej Unifikacji i poszukiwać śladów tych konsekwencji w dzisiejszym świecie.

Zajrzyjmy za Horyzont Fizyki, by zorientować się, jakie interesujące pytania możemy postawić, na które obecnie odpowiedzi nie znamy i wątpliwe, byśmy kiedykolwiek mieli je poznać.

Istnienie pierwotnej osobliwości wynika z klasycznej (niekwantowej) OTW. Gdy fizycznie interpretujemy tę geometryczną osobliwość, dostajemy Wielki Wybuch, a on sugeruje zjawiska kwantowej grawitacji. Czy efekty QG eliminują samą osobliwość? Nie wiemy.

Czy Wszechświat w ogóle miał początek? Nie wiemy.

Czy proces rozszerzania się Wszechświata jest jednorazowy, jak przewiduje model standardowy Friedmanna, czy powtarza się? Nie wiemy.

Kłopoty z pierwotną osobliwością i z teorią kwantowej grawitacji sprawiły, że powstało wiele spekulatywnych modeli, w których Wszechświat nie miał jednoznacznego początku, lecz wyłonił się z czegoś innego. Wszystkie oparte są nie na sprawdzonych teoriach fizycznych, lecz na wątpliwych hipotezach i spekulatywnych teoriach będących w stanie załączkowym, bez odwołania się do faktów empirycznych, których nie potrafimy wyjaśnić w ramach wiarygodnej fizyki (bo takich faktów nie znamy). Nie mając poparcia ani w faktach, ani w opinii krytycznych ekspertów, autorzy owych modeli usiłują je umocnić propagandowo prezentując je szerokiej publiczności w książkach popularno(pseudo)naukowych.

I wreszcie problem czysto filozoficzny: co jest lepsze – by Wszechświat miał początek, czy wieczne istnienie?

7. Problem warunków początkowych

Na zakończenie trzeba dodać, że za Horyzontem Fizyki znajdują się również warunki początkowe Wszechświata. Niezależnie od tego, czy Wszechświat miał początek (Wielki Wybuch lub coś podobnego), czy powstał z innej formy, pytamy: jakie były jego warunki początkowe na końcu ery Wielkiej Unifikacji? Warunki te były kluczowe, bowiem w ramach sprawdzonej fizyki, na jakiej opiera się Standardowy Model Kosmologiczny (ewentualnie uzupełniony koniecznymi modyfikacjami), określiły przebieg ewolucji wraz ze wszystkimi jego własnościami – to, że jest wielki, stary i przestrzennie (niemal) płaski oraz parametrami (stosunek liczby fotonów promieniowania reliktowego do liczby nukleonów). Niestety te warunki początkowe są ukryte za Horyzontem Fizyki, bowiem nie da się ich zbadać eksperymentalnie, gdyż Wszechświat jest jeden.

Nie ma sensu mówić o „prawach ustalających warunki początkowe dla Wszechświata”, bowiem rzecz dotyczy tylko jednego obiektu całego Wszechświata. W przeciwnym razie wracamy do hipotetycznej teorii całego Wszechświata, która ze swej konstrukcji ma tylko jeden opisywany obiekt i przypisuje mu tylko jeden możliwy stan, a jak mówiłem, teoria taka nie ma szans powstać. W sumie: *fizyka eksperymentalnie weryfikowalna nie może wyjaśnić natury początkowego stanu Wszechświata.*

Na pytanie: dlaczego ewolucja Wszechświata przebiega według specyficznego modelu Friedmanna (lub mu podobnego),

skoro inne procesy ewolucyjne są (chyba?) równie zgodne z prawami fizyki? odpowiedzi nie ma, a jak ktoś ją wymyśli, to nie da się jej sprawdzić empirycznie.

W ostatnim zdaniu dodam, że z punktu widzenia tego, o czym tu mówiłem, teoria strun posługując się kosmologią, wywraca całą fizykę fundamentalną, ale to odrębna kwestia.

Podziękowanie

Autor wyraża wdzięczność Fundacji Johna Templetona za wsparcie finansowe tego artykułu.

Bibliografia

- Bondi, H., 1961. *Cosmology*. 2nd ed. Cambridge: University Press.
- Ellis, G.F.R., 2006. Issues in the Philosophy of Cosmology. W: J. Butterfield, J. Earman, eds., *Handbook in philosophy of physics*, Dordrecht: Elsevier [arXiv:astroph/0602280].
- Ellis, G.F.R., Maartens, R., MacCallum, M., 2012. *Relativistic cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hawking, W., Ellis, G.F.R., 1973. *The large scale structure of space-time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jaroszyński, M., 2005. *Wielka Encyklopedia PWN*, t. 30. Warszawa: PWN.
- Kraśniński, A., 2014. Accelerating expansion or inhomogeneity? A comparison of the Λ CDM and Lemaître–Tolman models. *Physical Review D*, 89, 023520 [arXiv:1309.4368].
- Magnano, G., Sokołowski, L.M., 1994. Physical equivalence between Nonlinear Gravity Theories and a general-relativistic

- self-gravitating scalar field. *Physical Review D*, 50, s. 5039–5059 [gr-qc/9312008].
- Sexl, R.U., Urbantke, K., 1983. *Gravitation und Kosmologie*. 2. Aufl. Mannheim: Bibliograf. Inst.
- Sokołowski, L.M., 2007. Metric gravity theories and cosmology: I. Physical interpretation and viability. *Classical and Quantum Gravity*, 24, s. 3391–3411 [gr-qc/0702097].
- Steinhardt, P., 2014. Big Bang blunder bursts the multiverse bubble. *Nature*, 510, 5 June.
- Weinberg, S., 1989. The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61, s. 1–23.